



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
LETECKÝ ÚSTAV**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

## **ZKUŠEBNÍ METODY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ**

TEST METHODS OF COMPOSITE MATERIALS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**BOGDAN CIESLAR**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. JOSEF KLEMENT, CSc.**

BRNO 2008

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Letecký ústav

Akademický rok: 2007/08

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Cieslar Bogdan

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Zkušební metody kompozitních materiálů**

v anglickém jazyce:

### **Test Methods of Composite Materials**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Kompozitní materiály jsou důležitou skupinou leteckých konstrukčních materiálů. Jejich výsledné vlastnosti se tvoří až při výrobě součástí a velký význam má proto jejich zkoušení. V současné době existuje řada zkoušek mechanických vlastností podle různých národních i mezinárodních norem, které se vzájemně mohou významně lišit.

Cíle bakalářské práce:

Vytvoření stručné příručky o normovaných zkouškách mechanických vlastností kompozitních materiálů zpevněných uhlíkovými, skleněnými a aramidovými vlákny.

Seznam odborné literatury:

Soubory norem pro mechanické zkoušky kompozitních materiálů podle ISO, ASTM, EN.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Josef Klement, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2007/08.

V Brně, dne 26.11.2007

L.S.



prof. Ing. Antonín Pištěk, CSc.  
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

**ANOTACE:**

Stručná příručka o normovaných zkouškách mechanických vlastností kompozitních materiálů zpevněných uhlíkovými, skleněnými a aramidovými vlákny. Práce obsahuje přehled nejdůležitějších normovaných zkoušek používaných v letectví a jejich stručný popis.

Brief manual about standardized tests of mechanical properties fibre-reinforced plastic composites. Work includes survey most important standardized tests used in the aeronautics and their lineation.

**BIBLIOGRAFICKÁ CITACE:**

CIESLAR, B. *Zkušební metody kompozitních materiálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 37 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Josef Klement, CSc.

**MÍSTOPŘÍSEŽNÉ PROHLÁŠENÍ:**

Místopřísežně prohlašuji, že jsem byl seznámen s předpisy pro vypracování bakalářské práce a že jsem celou bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Brně dne 23.5.2008

.....  
Bogdan Cieslar

**PODĚKOVÁNÍ:**

Rád bych poděkoval panu doc. Ing. Josefovi Klementovi, CSc., za podporu a vedení při vypracovávání mé bakalářské práce

## Obsah

<b>1. Úvod.....</b>	<b>11</b>
<b>2. Kompozitní materiály .....</b>	<b>12</b>
2.1 Úvod do kompozitních materiálů.....	12
2.2 Struktura kompozitů a jejich rozdělení.....	12
2.3 Výroba kompozitních materiálů.....	14
<b>3. Zkušební metody pro testování kompozitních materiálů pro letectví .....</b>	<b>15</b>
<b>4. Normy pro zkoušky kompozitních materiálů.....</b>	<b>15</b>
4.1 Značení norem.....	15
4.2 Vybrané evropské normy převzaté ČNI (ČSN EN).....	16
4.3 Vybrané mezinárodní normy převzaté ČNI (ČSN ISO).....	17
4.4 Vybrané americké normy (ASTM).....	17
<b>5. Zkoušky pro plasty vyztužené uhlíkovými vlákny.....</b>	<b>18</b>
5.1 Zkouška tahem rovnoběžně se směrem vláken podle ČSN EN 2561 .....	18
5.2 Zkouška tahem kolmo na směr vláken podle ČSN EN 2597 .....	20
5.3 Zkouška ohybem ve směru vláken podle ČSN EN 2562 .....	22
5.4 Stanovení smykové pevnosti mezi vrstvami podle ČSN EN 2563 .....	24
<b>6. Zkoušky pro sklem vyztužené plasty .....</b>	<b>26</b>
6.1 Zkouška ohybem – Metoda třibodového ohybu podle ČSN EN 2746.....	26
6.2 Stanovení smykové pevnosti mezi vrstvami podle ČSN EN 2377.....	28
<b>7. Zkoušky pro vlákna vyztužené plasty .....</b>	<b>30</b>
7.1 Stanovení tahových vlastností podle ČSN EN ISO 527-4.....	30
7.2 Stanovení smykové pevnosti mezi vrstvami ASTM D 2344.....	32
7.3 Stanovení vlastností v tlaku v rovině výztuže podle ČSN EN ISO 14126.....	34



<b>8. Závěr.....</b>	<b>36</b>
<b>9. Seznam použité literatury.....</b>	<b>37</b>

## 1. Úvod

V současné době můžeme sledovat prudký rozmach výroby kompozitních materiálů a jejich aplikací v konstrukčních prvcích, leteckém, automobilovém a chemickém průmyslu, který má za následek vznik značného množství zkušebních metod.

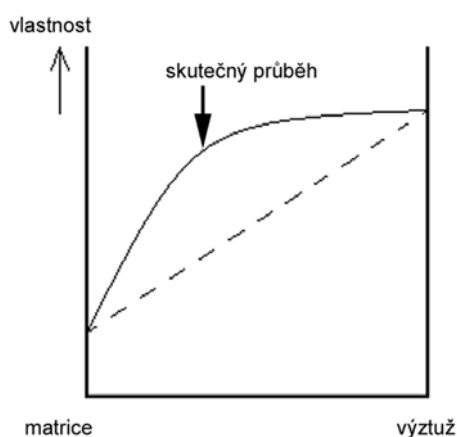
Díky netradičnosti kompozitních materiálů a poměrně krátkodobé zkušenosti s jejich používáním jsou mnohé metody zcela nové a specifické pro daný kompozit, takže u kovů a jiných tradičních materiálů se vůbec nepoužívají.

Následující kapitoly obsahují obecný pohled na kompozitní materiály, přehled a stručný popis norem pro jejich zkoušení.

## 2. Kompozitní materiály

### 2.1 Úvod do kompozitních materiálů

Pod pojmem kompozitní materiály rozumíme heterogenní materiály složené ze dvou nebo více fází, které se vzájemně výrazně liší svými mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Kompozity mohou být typu kov-kov, keramika-kov, keramika-polymer, keramika-keramika a polymer-polymer. Největšího průmyslového rozšíření dosáhly ve světě kompozity na bázi organických pryskyřic vyztužených různými typy keramických/anorganických vláken. Nejvýznamnější předností kompozitů s organickými matricemi je synergická kombinace snadné tvarovatelnosti nepevné pryskyřice s pevností a tuhostí vyztužujících vláken. (Synergismus - vlastnosti kompozitu jsou vyšší, než by odpovídalo pouhému poměrnému sečtení vlastností jednotlivých složek)



Obr. 1 Synergické chování složek kompozitu

Synergické chování kompozitů je způsobeno tím, že šířící se lomová trhlina je brzděna na rozhraní matrice a vláken. Dochází zde jednak k odklánění směru šíření trhliny, jednak k intenzivnímu vzájemnému tření mezi matricí a vytahujícími se vlákny. Kvalita rozhraní mezi matricí a výztuhou má tedy zásadní vliv na vlastnosti výsledného kompozitu.

### 2.2 Struktura kompozitů a jejich rozdělení

Kompozitní materiály lze rozdělit podle řady parametrů. Nejčastější je klasifikace podle povahy výztuže a podle povahy matrice.

**Matrice** – její úlohou v kompozitním profilu je jak spojovat výztuže dohromady, tak zajistit správné rozmístění výztuže v příčném řezu tak, aby byly zajištěny dobré mechanické vlastnosti

- a) kompozity s kovovou matricí
- b) kompozity s keramickou matricí
- c) kompozity se skleněnou matricí
- d) kompozity s uhlíkovou matricí
- e) kompozity s polymerní matricí

U kompozitů s polymerní matricí existují dva základní typy polymerních pryskyřic-pojiv:

**Termoplasty** - jsou tuhé látky, které měknou a tekou při zvýšení teploty. Po ochlazení opět přejdou do pevného skupenství (např. polystyren, polyetylén)

**Termosety** - jsou látky ve formě viskózních tekutin s konzistencí řídkého medu, které jsou vytvrzeny chemickou reakcí po dodání katalyzátoru a iniciátoru. Vytvrzený termoset zůstává v tuhé fázi i po zahřátí, což zvyšuje jeho odolnost proti creepu a vysokým teplotám. Kompozity s termosetovými matricemi jsou mezi konstrukčními aplikacemi vláknových kompozitů používány častěji (např. epoxidy, nenasyčené polyester, fenol formaldehyd)

**Výztuž** – jejím úkolem v kompozitním profilu je především zajistit mechanické vlastnosti materiálu (modul pružnosti, pevnost, tvrdost atd). Běžně užívaným typem výztuže jsou skleněné, uhlíkové, aramidové a kevlarové vlákna

a) jednosměrné (vlákna jsou orientována převážně v jednom směru):

- krátkovláknové (poměr délka/průměr je  $<100$ )
- dlouhovláknové (délka/průměr je  $> 100$  či kontinuální vlákna, t.j. vlákna s délkou rovnou rozměrům celého dílce)
- prepregy (nevytvrzenou pryskyřicí preimpregnované vrstvy vláken ve tvaru tenkých pásů různé šíře)

b) mnohosměrné (vlákna jsou náhodně nebo pravidelně orientována dvěma či více směry)

- krátkovláknové (poměr délka/průměr je  $<100$ )
- dlouhovláknové (délka/průměr je  $> 100$  či kontinuální vlákna, t.j. vlákna s délkou rovnou rozměrům celého dílce)
- prepregy (nevytvrzenou pryskyřicí preimpregnované vláknové rohože či tkaniny)
- lamináty (střídání vrstev jednosměrných kompozitů s různými vzájemnými orientacemi výztuže)
- lamináty s tkanou výztuží (střídání vrstev vyztužujících rohoží, ve kterých jsou vlákna před prosycením pryskyřicí utkána běžnými nebo speciálními textilními technologiemi)
- lamináty s netkanou výztuží (střídání vrstev vyztužujících rohoží, ve kterých jsou vlákna zpracována do rovin aniž by byla tkána)

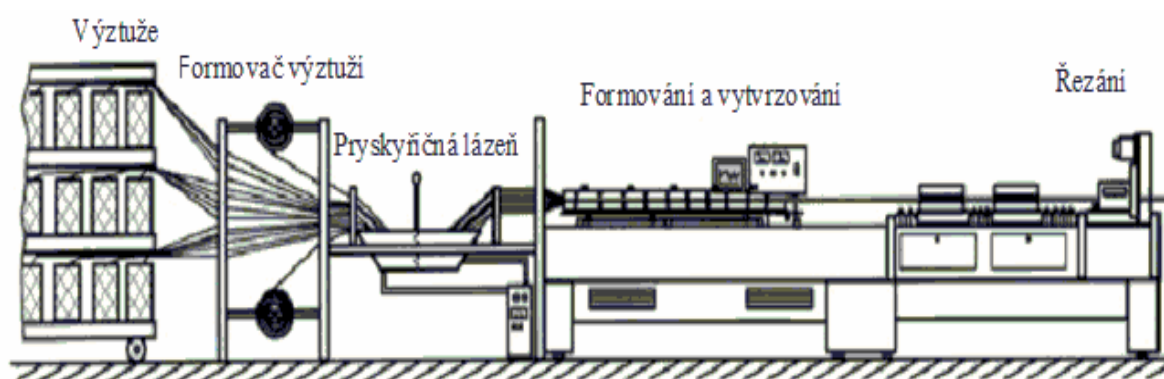
## 2.3 Výroba kompozitních materiálů

Jeden ze způsobů výroby je pultruze, která představuje kontinuální výrobní proces kompozitních profilů, jež mají konstantní příčný řez a jsou využívány pro specifické účely. Metoda zajišťuje opakovaně konstantní kvalitu. Pultruze je založena na tažení vyztužujícího materiálu (vláken), který je tažen přes naváděcí prvky. Jimi se vlákna precizně rozmisťují podle tvaru příčného řezu výrobku.

Následně jsou možné dva způsoby jejich kontaktu s matricí:

- a) vlákna jsou vedena skrz impregnační vanu, kde se prosycují matricí a tato směs prosycených vláken a matrice se vede do formy, kde dojde ke konečnému zformování a k vytvrzení do požadovaného tvaru
- b) vstřikování, při němž dochází k vtažení výztuže do formy, do které je vstřikována pryskyřice. Ve formě je profil prohříván a dochází k jeho vytvrzování. Ke konečnému vytvrzení dochází v poslední části výrobního zařízení. Profil opouštějící výrobní zařízení je zcela tvarově stálý a pevný

Injektážní metoda je zcela uzavřený proces, který udržuje vypařování rozpouštědel na minimální úrovni. Tím se zajišťuje dobré pracovní prostředí v porovnání s tradiční pultruzí, kde se výztuž vede otevřenou vanou obsahující matrici. Následně je profil tažen k pile, která řeže profily na stanovenou délku.



obr 2. Pultruzní linka

### 3. Zkušební metody pro testování kompozitních materiálů pro letectví

Úspěšná práce s kompozity nemůže být založena jen na teoretických výpočtech. Vyžaduje spolehlivé a přesné ověření teoreticky získaných dat týkajících se pevnosti, spolehlivosti a životnosti konstrukčních dílů i celých konstrukcí z kompozitů. V úvahu je třeba brát dále např. teplotu, agresivitu prostředí a řadu dalších vlivů, pod jejichž účinkem bude kompozitní konstrukce využívána. Jen důkladné experimentální ověření kompozitní konstrukce letounu z hlediska pevnosti a spolehlivosti může vymezit jeho bezpečné letové vlastnosti v době stanovené životnosti. Spolehlivé informace o zatížení konstrukce letounu za letu jsou pro konstruktéry klíčové a vzhledem ke značné variabilitě pevnostních a životnostních vlastností kompozitních materiálů (druh vlákna, pryskyřice, skladba vláken a vrstev atd.) umožňují tyto informace optimalizovat složení kompozitních materiálů. Tím se zvýší nejen bezpečnost provozu těchto letounů, ale sníží se i jejich hmotnost. Každý ušetřený gram hmotnosti letounu má příznivý vliv na jeho provozní parametry. To je důvod, proč v posledních desetiletích prodávají kompozitní materiály velice dynamický rozvoj, který zdaleka nekončí.

Tento prudký rozmach výroby kompozitů a jejich aplikací v konstrukčních prvcích, letectví a v dalších oblastech vedl ke vzniku značného množství zkušebních metod většinou odrážejících specifika dané oblasti. V důsledku netradičnosti kompozitních materiálů a poměrně krátkodobé zkušenosti s jejich používáním jsou mnohé metody zcela nové a u kovů a jiných tradičních materiálů se vůbec nepoužívají. Jelikož je rozvoj kompozitů i geograficky velmi nerovnoměrný, dochází ke vzniku víceméně stejných norem a standardů na různých místech pod dohledem různých standardizačních institucí. To má za následek špatnou reprodukovatelnost dat a porovnání materiálů vyhovujících stejným standardům v různých zemích může poskytovat podstatně odlišné výsledky. V souvislosti se zaváděním společného trhu dochází v Evropě k postupné unifikaci těchto zkušebních metod pod hlavičkou ISO (International Standards Organization). Jako základ mezinárodních norem se potom berou ty národní či podnikové normy, které se v minulosti nejvíce osvědčily či ty, které je možno co nejlépe interpretovat na vědeckém základě.

V některých případech lze použít data získaná ze zkušebních metod i pro konstrukční výpočty, avšak z valné části jsou tato data použitelná pouze pro kontrolu kvality výroby. Pro získání dat relevantních pro konstrukční výpočty je třeba měřit vlastnosti kompozitů při velmi přesně definovaných zatíženích a za přesných a čistých napětíových poměrech ve zkoušeném tělese idealizovaného tvaru. Nejzákladnějším předpokladem dobrého fungování jakéhokoliv kompozitního materiálu je velmi rovnoměrné zatěžování výztuže, které omezuje pravděpodobnost lokální kumulace defektů a poruch v místě nerovnoměrného zatížení vláken. Navíc je pro úspěšné použití takto získaných dat bezpodmínečně nutné znát napětíové poměry v navrhovaném výrobku tak, aby bylo možno využít přednosti kompozitů a maximálně potlačit jejich nedostatky (příčné vlastnosti).

### 4. Normy pro zkoušky kompozitních materiálů

#### 4.1 Značení norem

ISO – norma vydaná Mezinárodní organizací pro normalizaci (International Standards Organization), zal. 1946, sídlo: Ženeva

EN – norma vydaná Evropskou komisí pro standardizaci (CEN – European Committee for Standardisation), zal. 1961, sídlo: Brusel

ČSN – norma vydaná Českým normalizačním institutem (ČNI), zal. 1922, sídlo: Praha

DIN – norma vydaná Německým ústavem pro normalizaci (Deutsches Institut für Normung e.V.), zal. 1917, sídlo: Berlín

GOST – norma vydaná Státním výborem Ruské federace pro normalizaci a metrologii (Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии), zal. 2004, sídlo: Moskva

ASTM – norma vydaná Americkou společností pro testování a materiály (American Society for Testing and Materials), zal. 1898, sídlo: West Conshohocken, Pennsylvania

#### 4.2 Vybrané evropské normy převzaté ČNI (ČSN EN)

ČSN EN 2377	Letectví a kosmonautika - Sklem vyztužené plasty - Stanovení smykové pevnosti mezi vrstvami
ČSN EN 2561	Letectví a kosmonautika - Plasty vyztužené uhlíkovými vlákny - Jednosměrné kompozity - Zkouška tahem rovnoběžně se směrem vláken
ČSN EN 2562	Letectví a kosmonautika - Plasty vyztužené uhlíkovými vlákny - Jednosměrné kompozity - Zkouška ohybem ve směru vláken
ČSN EN 2563	Letectví a kosmonautika - Plasty vyztužené uhlíkovými vlákny - Jednosměrné kompozity - Stanovení smykové pevnosti mezi vrstvami
ČSN EN 2597	Letectví a kosmonautika - Plasty vyztužené uhlíkovými vlákny - Jednosměrné kompozity - Zkouška tahem kolmo na směr vláken
ČSN EN 2743	Letectví a kosmonautika - Vlákný vyztužené plasty - Standardní postupy kondicionování materiálů bezprostředně po výrobě před zkoušením
ČSN EN 2746	Letectví a kosmonautika - Sklem vyztužené plasty - Zkouška ohybem - Metoda tříbodového ohybu
ČSN EN 2747	Letectví a kosmonautika - Sklem vyztužené plasty - Zkouška tahem

**4.3 Vybrané mezinárodní normy převzaté CEN a ČNI (ČSN EN ISO)**

ČSN EN ISO 14125	Vlákný vyztužené plastové kompozity - Stanovení ohybových vlastností
ČSN EN ISO 14126	Vlákný vyztužené plastové kompozity - Stanovení vlastností v tlaku v rovině výztuže
ČSN EN ISO 15310	Vlákný vyztužené plastové kompozity - Stanovení modulu pružnosti ve smyku metodou torzní desky
ČSN EN ISO 14130	Vlákný vyztužené plastové kompozity - Stanovení zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti metodou krátkého nosníku
ČSN EN ISO 527-1	Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 1: Základní principy
ČSN EN ISO 527-2	Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty
ČSN EN ISO 527-3	Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 3: Zkušební podmínky pro fólie a desky
ČSN EN ISO 527-4	Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 4: Zkušební podmínky pro izotropní a orthotropní plastové kompozity vyztužené vlákny
ČSN EN ISO 527-5	Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 5: Zkušební podmínky pro plastové kompozity vyztužené jednosměrnými vlákny

**4.4 Vybrané americké normy (ASTM)**

ASTM D 2344	Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates
ASTM D 3039	Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials
ASTM D 3846	Standard Test Method for In-Plane Shear Strength of Reinforced Plastics



## 5. Zkoušky pro plasty vyztužené uhlíkovými vlákny

### 5.1 Zkouška tahem rovnoběžně se směrem vláken podle ČSN EN 2561

#### Předmět normy

- norma uvádí metodu stanovení pevnosti v tahu, modulu pružnosti v tahu a pokud se požaduje, tak i Poissonova čísla a prodloužení při poruše v tahu pro plasty vyztužené uhlíkovými vlákny
- metoda je použitelná pouze pro zkušební tělesa, jejichž podélná osa je rovnoběžná se směrem vláken

#### Podstata zkoušky

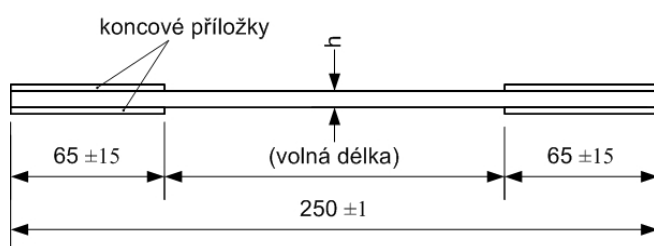
- spočívá v měření podélného prodloužení a pokud se vyžaduje i příčného zúžení zkušební tělesa ve vztahu k působící síle během tahové zkoušky, která je až do poruchy prováděná při konstantní rychlosti posuvu

#### Zkušební zařízení

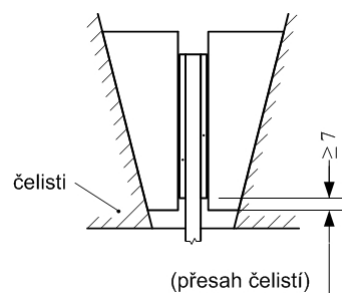
- mikrometr s přesností 0,01 mm
- zkušební zařízení s přesností 1 % v rozsahu použité síly
- přístroj na zaznamenání prodloužení ve vztahu k síle (extenzometr nebo tenzometry) s přesností 1 % v rozsahu měřeného prodloužení (přístroj nesmí být uchycen na zkušebním tělese takovým způsobem, který by zapříčinil předčasnou poruchu)
- pro zkoušky při teplotách odlišných od teploty okolí - topná komora s regulací teploty podle EN 2744
- teplotní čidlo a zapisovač

#### Zkušební tělesa

- počet zkušebních těles – nejméně pět



obr.3 Zkušební těleso typu A a B



obr.4 Upevnění při zkoušce

Tab.1 Rozměry zkušebních těles

rozměry v [mm]

Symbol	Typ zkušebního tělesa		
	A <sup>2)</sup>	B <sup>2)</sup>	C <sup>3)</sup>
b	10 ±0,5	15 ±0,5	15 ±0,5
h <sup>1)</sup>	2 ±0,2	1 ±0,2	1 ±0,2

<sup>1)</sup> Pokud tloušťka vrstev způsobuje nějakou nejistotu týkající se počtu vrstev nutných k požadované tloušťce kompozitu, musí být tento počet vrstev uveden v odpovídající materiálové normě  
<sup>2)</sup> Zkušební tělesa jsou opatřena na koncích příložkami ze skelného epoxidového laminátu (typ tkaniny 1581, orientace ±45°, tloušťka mezi 0,5 a 1 mm). Příložky na koncích jsou přilepeny. (viz obr.3)  
<sup>3)</sup> Zkušební tělesa bez koncových příložek jsou určena pro zkušební zařízení s čelistmi jejichž přítlak je během zkoušky regulován (hydraulické zařízení nebo obdobné)

**Postup zkoušky**

- kondicionování – EN 2743, EN 2489, EN 2823
- změří se šířka, tloušťka s přesností na 0,01 mm ve středu zkušební tělesa a ve dvou opačných bodech vzdálených 30 mm od středu zkušební tělesa (b, h je aritmetický průměr z těchto tří měření)
- aby se zabránilo zavedení jakéhokoliv ohybového namáhání musí se zajistit, aby podélná osa zkušební tělesa a osa upínacích čelistí byly v jedné přímce
- čelisti zkušební stroje musí sevřít příložky zkušebních těles typu A a B (viz obr.4)
- zatěžuje se konstantní rychlostí 2 mm/min vzájemného posuvu upínacích čelistí
- zaznamená se prodloužení  $\varepsilon_{11}$  a pokud je potřebné, tak i  $\varepsilon_{22}$  jako funkce působící síly a to za pomoci extenzometru nebo tenzometrů
- zaznamená se síla v okamžiku poruchy  $P_R$  a pokud je potřebné, tak i prodloužení v okamžiku poruchy  $(\varepsilon_{22})_R$

**Vyjádření výsledků***pevnost v tahu [MPa]*

$$\sigma_{T11} = \frac{P_R}{b \cdot h}$$

*pevnost v tahu vztažená na vlákna [MPa]*

$$\sigma_f = \frac{P_R \cdot \rho_f}{n \cdot b \cdot M_{sf}}$$

*sečný modul mezi body  $P_R/10$  a  $P_R/2$  [MPa]*

$$E_{T11} = \frac{0,4 \cdot P_R}{b \cdot h \cdot [(\varepsilon_{11})_B - (\varepsilon_{11})_A]}$$

*sečný modul mezi body  $P_R/10$  a  $P_R/2$  vztažený na vlákna [MPa]*

$$E_f = \frac{0,4 \cdot P_R \cdot \rho_f}{n \cdot b \cdot M_{sf} \cdot [(\varepsilon_{11})_B - (\varepsilon_{11})_A]}$$

*Poissonovo číslo*

$$\nu_{12} = \left| \frac{(\varepsilon_{22})_B - (\varepsilon_{22})_A}{(\varepsilon_{11})_B - (\varepsilon_{11})_A} \right|$$

*Poměrné prodloužení při poruše [%]*

$$A = 100 \cdot (\varepsilon_{11})_R$$

kde	$P_R$ je síla v okamžiku poruchy [N]
	b šířka [mm]
	h tloušťka [mm]
	n počet vrstev
	$M_{st}$ plošná hmotnost vláken [ $\text{g/m}^2$ ] na vrstvu
	$\rho_f$ měrná hmotnost vláken [ $\text{kg/m}^3$ ]
	$(\varepsilon_{11})_A$ prodloužení ve směru vláken odpovídající $P_R/10$
	$(\varepsilon_{11})_B$ prodloužení ve směru vláken odpovídající $P_R/2$
	$(\varepsilon_{22})_A$ prodloužení ve směru vláken odpovídající $P_R/10$
	$(\varepsilon_{22})_B$ prodloužení ve směru vláken odpovídající $P_R/2$
	$(\varepsilon_{11})_R$ prodloužení při poruše ve směru vláken

**Platnost výsledků**

- porucha musí nastat v oblasti volné délky, ale může se rozšířit i pod příložky nebo do oblasti čelistí zkušební zařízení

## 5.2 Zkouška tahem kolmo na směr vláken podle ČSN EN 2597

### Předmět normy

- norma popisuje metodu stanovení pevnosti v tahu, modulu v tahu a, pokud je to požadováno, Poissonova čísla a prodloužení při porušení v tahu
- pouze pro zkušební tělesa, jejichž osa je kolmá na směr vláken

### Podstata zkoušky

- spočívá v měření podélných a, pokud je požadováno, i příčných poměrných prodloužení materiálu ve vztahu k působící síle v průběhu tahové zkoušky prováděné konstantní rychlostí až do porušení
- mohou být použity dva typy zkušebních těles (A a B) s výrazně odlišnými výsledky pokud jde o střední hodnoty a rozptyl – proto je třeba uvést, se kterým typem zkušebních těles se pracovalo

### Zkušební zařízení

- mikrometr s přesností měření  $\pm 0,01$  mm
- zkušební stroj s přesností  $\pm 1\%$  rozsahu použité síly
- zařízení k záznamu poměrných prodloužení ve vztahu k působící síle (extenzometry nebo tenzometry) s přesností  $\pm 1\%$  použitého rozsahu poměrného prodloužení (zařízení nesmí ovlivnit zkušební těleso způsobem, který by měl za následek jeho předčasné porušení)
- pro zkoušky při teplotách odlišných od teploty okolí - temperační komora s regulací podle EN 2744
- teplotní čidlo a zapisovač

### Zkušební tělesa

- počet zkušebních těles – nejméně deset (tento počet je nutný vzhledem k značnému rozptylu výsledků, který je pro tuto zkoušku specifický)
- desky musí mít zakřivení nižší než následující poměrná hodnota:

$$\frac{f}{k} \leq 0,002 \quad \text{kde } \frac{f}{k} \text{ je křivost [mm] vztahná délka [mm]}$$

Tab.2 Rozměry zkušebních těles

rozměry v [mm]

	Symbol	Typ A	Typ B
délka	L	250 $\pm$ 1	250 $\pm$ 1
šířka	b	25 $\pm$ 0,5	25 $\pm$ 0,5
tloušťka <sup>1)</sup>	h	2 $\pm$ 0,2	2 $\pm$ 0,2
délka koncových příložek <sup>2)</sup>	t	120	60
volná délka	g	10 $\pm$ 1	130 $\pm$ 1
přesah čelistí	c	$\geq$ 7	$\geq$ 7
upínací délka	d	50 $\pm$ 1	t

<sup>1)</sup> Jestliže tloušťka vrstvy způsobuje jakoukoliv nejistotu, týkající se počtu vrstev nutných k získání kompozitu požadované tloušťky, musí být tento počet stanoven v materiálové normě

<sup>2)</sup> Zkušební tělesa musí být opatřena koncovými příložkami z kompozitu sklo-epoxid (tloušťka vrstvy 0,2 až 0,3 mm) s orientací vláken  $\pm 45^\circ$  k podélné ose. Koncové příložky se přilepí lepidlem slučitelným s podmínkami zkoušky i teplotními charakteristikami koncových příložek a materiálu zkušebních těles

**Postup zkoušky**

- kondicionování – EN 2743, EN 2489, EN 2823
- tělesa typu A- změří se šířka s přesností  $\pm 0,01$  mm v rozsahu volné délky
  - s přesností  $\pm 0,01$  mm se v rozsahu volné délky třikrát změří tloušťka zkušební tělesa, postupně ve směru jeho šířky
  - h je aritmetický průměr těchto měření
- tělesa typu B- s přesností  $\pm 0,01$  mm se změří šířka, tloušťka zkušební tělesa v jeho středu a dále ve dvou protilehlých bodech vzdálených od středu 50 mm
  - b,h je aritmetický průměr těchto měření
- zkušební tělesa musí být upnuta v čelistech zkušební stroje tak, aby se zabránilo vnesení jakýchkoliv zatížení v ohybu
- zatěžování musí probíhat s konst. rychlostí vzájemného posuvu čelistí 0,5 mm/min
- pomocí extenzometrů nebo tenzometrů se zaznamenává poměrné prodloužení  $\varepsilon_{22}$  a pokud je to nutné i poměrné prodloužení  $\varepsilon_{11}$  jako funkce působící síly
- zaznamenaná se síla působící v okamžiku porušení  $F_R$  a pokud je to nutné i poměrné prodloužení při porušení  $(\varepsilon_{22})_R$

**Vyjádření výsledků***pevnost v tahu [MPa]*

$$\sigma_{T22} = \frac{F_R}{b \cdot h}$$

*sečný modul mezi body  $F_R/10$  a  $F_R/2$  [MPa]*

$$E_{T22} = \frac{0,4 \cdot F_R}{b \cdot h \cdot [(\varepsilon_{22})_B - (\varepsilon_{22})_A]}$$

*Poissonovo číslo*

$$\nu_{21} = \left[ \frac{(\varepsilon_{11})_B - (\varepsilon_{11})_A}{(\varepsilon_{22})_B - (\varepsilon_{22})_A} \right]$$

*poměrné prodloužení při porušení [%]*

$$a_{22} = 100 \cdot (\varepsilon_{22})_R$$

- kde  $F_R$  je síla v okamžiku porušení [N]  
 b šířka [mm]  
 h tloušťka [mm]  
 $(\varepsilon_{11})_A$  poměrné prodloužení rovnoběžné se směrem vláken odpovídající síle  $F_R/10$   
 $(\varepsilon_{11})_B$  poměrné prodloužení rovnoběžné se směrem vláken odpovídající síle  $F_R/2$   
 $(\varepsilon_{22})_A$  poměrné prodloužení ve směru kolmém na směr vláken odpovídající síle  $F_R/10$   
 $(\varepsilon_{22})_B$  poměrné prodloužení ve směru kolmém na směr vláken odpovídající síle  $F_R/2$   
 $(\varepsilon_{11})_R$  prodloužení při poruše ve směru vláken

**Platnost výsledků**

- porucha musí nastat v rozsahu volné délky zkušební tělesa
- jestliže se těleso poruší pod koncovými příložkami a působící síla dále roste, tohoto prvního porušení se nedbá a zkouška pokračuje dokud k porušení nedojde v rozsahu volné délky

### 5.3 Zkouška ohybem ve směru vláken podle ČSN EN 2562

#### Předmět normy

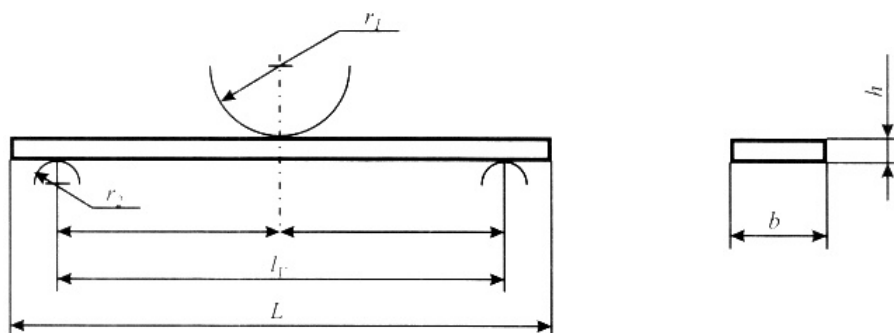
- norma uvádí metodu stanovení pevnosti v ohybu a modulu pružnosti v ohybu
- jen pro zkušební tělesa, jejichž podélná osa je rovnoběžná se směrem vláken
- modul pružnosti, měřený touto metodou, lze považovat jen za přibližnou hodnotu Youngova modulu

#### Podstata zkoušky

- spočívá v měření průhybu pod středním zatěžovacím trnem v závislosti na působícím zatížení, v průběhu zkoušky tříbodovým ohybem prováděné konstantní rychlostí posuvu, až do okamžiku poruchy
- poměrná deformace ve směru rovnoběžném s vlákny je vypočtena jako závislost na působícím napětí

#### Zkušební zařízení

- mikrometr s přesností 0,01 mm
- zkušební stroj s přesností 1 % v rozsahu použitého zatížení
- přístroj na zaznamenání průhybu v závislosti na působícím zatížení s přesností 1 %
- pro zkoušky při teplotách odlišných od teploty okolí - temperační komora s regulací podle EN 2744
- termočlánek a zapisovač
- odchylka rovnoběžnosti podpěr a pohyblivého trnu nesmí překročit 0,1 mm



obr.5 Umístění tělesa při zkoušce

#### Zkušební těleso

- počet zkušebních těles – nejméně pět
- pokud tloušťka jedné vrstvy způsobí nejednoznačnost v počtu potřebných vrstev pro kompozit o požadované tloušťce, musí být počet těchto vrstev určen mat. normou
- pokud není určeno jinak materiálovou normou, používá se zkušební těleso typu A

Tab.3 Rozměry zkušebních těles a rozvržení zkoušky

rozměry v [mm]

	Symbols	Typ A	Typ B
délka	L	100 ±1	60 ±1
šířka	b	10 ±0,2	10 ±0,2
tloušťka	h	2 ±0,2	2 ±0,2
poloměr zatěžovacího trnu	$r_1$	12,5 ±0,1	12,5 ±0,1
poloměr podpěr	$r_2$	5 ±0,1	5 ±0,1
vzdálenost podpěr	$l_v$	80 ±0,5	50 ±0,5

**Postup zkoušky**

- kondicionování – EN 2743, EN 2489, EN 2823
- změří se šířka  $b$  uprostřed tělesa s přesností na 0,01 mm
- určí se  $h$  jako aritmetický průměr ze tří měření s přesností na 0,01 mm, rozložených po šířce uprostřed tělesa
- změří se rozpětí podpor  $l_v$  s přesností 0,1 mm
- zkušební těleso se umístí do přípravku tak, aby povrch tělesa byl v kontaktu se zatěžovacím trnem a aby osa zkušební tělesa byla kolmá na podpory (viz obr.5)
- působící zatížení musí být aplikováno tak, aby rychlost posuvu byla konstantní:
  - a) 5 mm/min pro zkušební těleso typu A
  - b) 2 mm/min pro zkušební těleso typu B
- zaznamenává se průhyb  $f$  v závislosti na působícím zatížení
- zaznamená se síla  $P_R$  v okamžiku poruchy

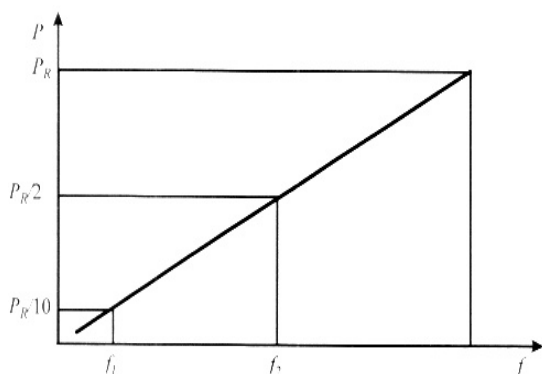
**Vyjádření výsledků**

mez pevnosti v ohybu  $\sigma_b$  [MPa]

$$\sigma_b = \frac{3 \cdot P_R \cdot l_v}{2 \cdot b \cdot h^2}$$

modul pružnosti v ohybu  $E_b$  [MPa]

$$E_b = \frac{P_R \cdot l_v^3}{10 \cdot b \cdot h^3 \cdot (f_2 - f_1)}$$

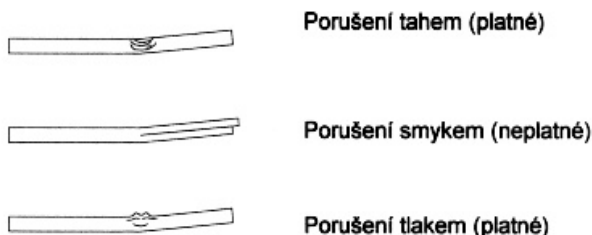


- kde  $P_R$  je velikost působícího zatížení v okamžiku poruchy [N]  
 $b$  šířka [mm]  
 $h$  tloušťka [mm]  
 $f_1$  průhyb odpovídající působícímu zatížení  $P_R/10$  [mm]  
 $f_2$  průhyb odpovídající působícímu zatížení  $P_R/2$  [mm]

obr.6 Křivka závislosti průhyb/zatížení

**Platnost výsledků**

- zkušební těleso je zkoušeno při dostatečně velkém rozpětí podpor, aby nedošlo k porušení smykem a aby bylo možno zanedbat deformace způsobené namáháním ve smyku
- zkouška je reprezentativní pro chování materiálu v ohybu pouze v případě, kdy dojde k poruše buď tahem nebo tlakem (viz obr.7)
- pokud nedošlo ke zlomení zkušební tělesa ohybem (poruchou v tahu nebo v tlaku), mez pevnosti vypočítaná podle vztahu v předchozím bodě je menší než skutečná mez pevnosti v ohybu materiálu



obr.7 Příklady poruch

## 5.4 Stanovení smykové pevnosti mezi vrstvami podle ČSN EN 2563

### Předmět normy

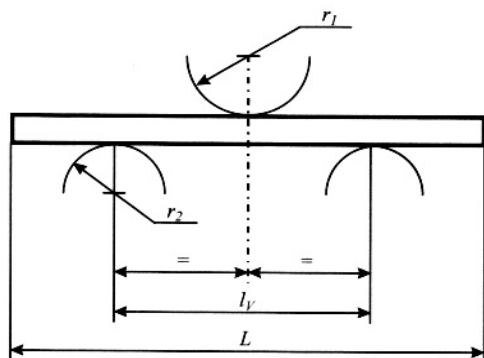
- norma uvádí metodu stanovení meze smykové pevnosti mezi vrstvami zkouškou ohybem pro plasty, vyztužené uhlíkovými vlákny
- pro použití na zkušební tělesa, jejichž podélná osa je rovnoběžná z osou vlákna
- použitelná rovněž pro plasty, vyztužené uhlíkovými vlákny ve formě tkanin (při různé orientaci vláken pouze pro porovnání kompozitů se shodnou skladbou vláken)

### Podstata zkoušky

- zkouška dává informace o kvalitě spojení mezi vlákny a pryskyřicí
- jde o zatěžování vzorku obdélníkového průřezu ohybem na dvou podpěrách
- zatížení je aplikováno uprostřed délky zkušební tělesa, v polovině rozpětí mezi podpěrami

### Zkušební zařízení

- mikrometr s přesností měření na 0,01 mm
- zkušební stroj s přesností na 1% v rozsahu použitého zatížení
- zařízení pro záznam zatížení v závislosti na čase nebo posuvu zatěžovacího trnu
- pro zkoušky při teplotách odlišných od teploty okolí - temperační komora s regulací podle EN 2744
- termočlánek se záznamem



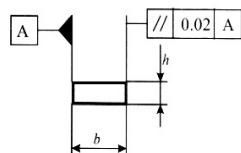
obr.8 Umístění tělesa při zkoušce

- $r_1 = 3 \pm 0,1 \text{ mm}$
- $r_2 = 3 \pm 0,1 \text{ mm}$
- $l_v = 10 \pm 0,1 \text{ mm}$
- $l_v = 5 \cdot h_{stř} \pm 0,1 \text{ mm}$  - pro kvalifikační zkoušky a ve sporných případech, kde  $h_{stř}$  je aritmetický průměr tloušťek ze série zkušebních těles

- zařízení musí umožňovat nastavení vzdálenosti mezi podpěrami
- zařízení musí zajistit správné umístění zkušební tělesa a vystředění zatěžovacího trnu vůči podpěrám s přesností menší než 0,02 mm
- odchylka rovnoběžnosti podpěr a zatěžovacího trnu nesmí překročit 0,02 mm

### Zkušební těleso

- počet zkušebních těles – nejméně pět



obr.9 Rozměry zkušební tělesa

Délka  $L = 20 \pm 0,25 \text{ mm}$

Šířka  $b = 10 \pm 0,1 \text{ mm}$

Tloušťka  $h = 2 \pm 0,2 \text{ mm}$

Podmínka rozptylu tloušťek těles

$$\frac{h_{\max} - h_{\min}}{h_{stř}} \leq 0,05$$

- pokud by tloušťka jedné vrstvy způsobila neurčitost počtu vrstev nezbytných pro obdržení kompozitu požadované celkové tloušťky, je nutno počet vrstev určit materiálovou normou
- délka tělesa je rovnoběžná se směrem vláken pro jednosměrné kompozity a rovnoběžná se směrem vláken osnovy pro tkaniny

**Postup zkoušky**

- kondicionování – EN 2743, EN 2489, EN 2823
- změří se šířka  $b$  uprostřed tělesa s přesností na 0,01 mm
- určí se  $h$  jako aritmetický průměr ze tří měření s přesností na 0,01 mm, rozložených po šířce uprostřed tělesa
- změří se rozpětí podpěr  $l_v$  s přesností 0,1 mm (viz obr.8)
- zkušební těleso se umístí do přípravku tak, aby osa tělesa byla kolmá na podpory
- zkušební těleso se plynně zatíží tak, aby rychlost posuvu zatěžovacího trnu byla  

$$V = (1 \pm 0,1) \text{ mm/min}$$
- zaznamenává se síla v závislosti na čase nebo na posuvu zatěžovacího trnu
- zaznamená se síla v okamžiku poruchy ( $P_R$ )

**Vyjádření výsledků**

*pevnost ve smyku mezi vrstvami*

$$\tau = \frac{3 \cdot P_r}{4 \cdot b \cdot h}$$

$\tau$  – smyková pevnost mezi vrstvami [MPa]

$P_R$  – velikost působící síly v okamžiku poruchy [N]

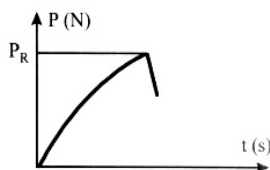
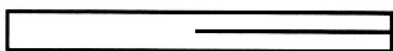
$b$  – šířka [mm]

$h$  – tloušťka [mm]

**Platnost výsledků**

- pokud dojde k poruše tělesa smykem přibližně na úrovni neutrální osy (viz obr.10a), mez smykové pevnosti mezi vrstvami se počítá dle vztahu daného v předchozím bodě
- pokud dojde k poruše zkušebního tělesa ohybem nebo plastickou deformací (viz obr.10b), není hodnota daná vztahem z předchozího bodu skutečnou mezí interlaminární smykové pevnosti (výsledek může být použit jedině pro porovnání s výsledky zkoušek, prováděných na vzorcích ze stejného materiálu)

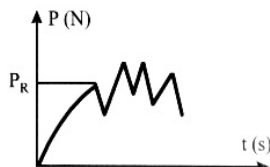
Jednoduchý smyk



Plastická deformace



Vícenásobný smyk



Porucha ohybem



obr.10a Platné poruchy

obr.10b Neplatné poruchy



## 6. Zkoušky pro sklem vyztužené plasty

### 6.1 Zkouška ohybem – Metoda třibodového ohybu podle ČSN EN 2746

#### Předmět normy

- popisuje metodu třibodového ohybu ke stanovení vlastností v ohybu skelnými vlákny vyztužených plastů pro letectví a kosmonautiku

#### Podstata zkoušky

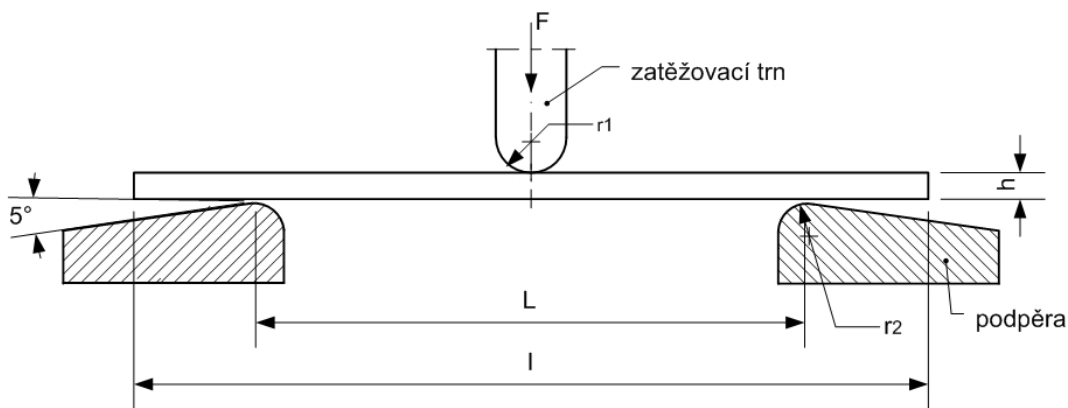
- spočívá v měření průhybu v místě působení zatěžovacího trnu jako funkce působící síly v průběhu zkoušky v ohybu prováděné konstantní rychlostí až do porušení.
- deformace rovnoběžná se směrem délky zkušební tělesa je vypočtená jako funkce působícího napětí v ohybu

#### Zkušební zařízení

- zkušební stroj umožňující dosažení konstantní rychlosti vzájemného posuvu zatěžovacího trnu a podpor, zaznamenávající síly s přesností  $\pm 1\%$  a průhyby s přesností  $\pm 2\%$
- podpory a zatěžovací trn musí být nejméně tak široké jako zkušební těleso a musí být vzájemně rovnoběžné
- vzdálenost mezi podporami musí být nastavitelná
- rozměry poloměru zatěžovacího trnu a poloměru podpor:

$$r_1 = (5 \pm 0,1) \text{ mm}$$

$$r_2 = (2 \pm 0,2) \text{ mm}$$



obr.11 Umístění tělesa při zkoušce

#### Zkušební tělesa

- počet zkušebních těles – nejméně pět
- rozměry v [mm]:

tloušťka	h	$(3 \pm 0,2)$
šířka	b	$(15 \pm 0,5)$
délka	l	$([20 \times h] \pm 1)$

- jestliže není možné získat zkušební tělesa z hotových součástí, připraví se zkušební desky podle EN 2374 nebo jinou vhodnou metodou
- jestliže je nutné používat zkušební tělesa větší tloušťky než 3 mm, nebo je-li očekáváno porušení zkušebních těles v tlaku, poloměr zakřivení podpor se může zvětšit za podmínky, že:  $r_2 \leq 1,5 h$

**Postup zkoušky**

- kondicionování – EN 2743, EN 2489, EN 2823
- ve střední části tělesa se změří šířka  $b$  s přesností  $\pm 0,1$  mm a poté se provedou tři měření tloušťky  $h$  s přesností  $\pm 0,02$  mm a vypočte se jejich aritmetický průměr
- vzdálenost mezi podporami (měří se s přesností  $\pm 0,5\%$ ) se nastaví dle rovnice:

$$L = (16 \cdot h) \pm 1 \quad \text{kde } L \text{ je vzdálenost mezi podporami [mm]} \\ h \text{ tloušťka zkušební tělesa [mm]}$$

- zkušební rychlost

$$V = \frac{S_r \cdot L^2}{6 \cdot h} \quad \text{kde } V \text{ je zkušební rychlost [mm/min]} \\ S_r \text{ rychlost poměrné deformace [jednotky/min]}$$

- zkušební těleso se uloží symetricky na podpory (směr délky kolmý na podpory)
- je třeba zajistit, aby zatěžovací trn byl umístěn přesně ve středu vzdálenosti mezi podporami a síla působila s konstantní rychlostí bez rázů (viz obr.11)
- síla a průhyb se zaznamenají současně
- dále se zaznamenají požadované charakteristiky
  - za smluvního průhybu
  - při působení maximální síly
  - při porušení

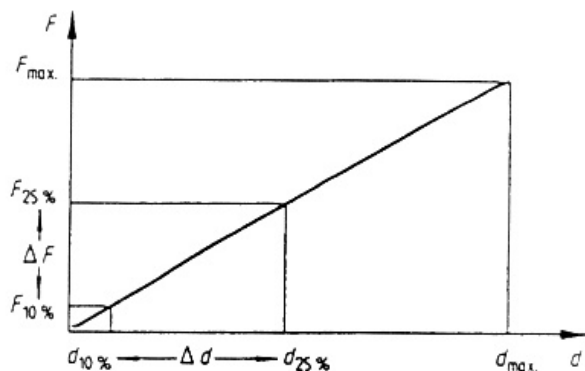
**Vyjádření výsledků**

napětí v ohybu  $\sigma_f$  [MPa]

$$\sigma_f = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2}$$

modul v ohybu  $E_f$  [MPa]

$$E_f = \frac{L^3}{4 \cdot b \cdot h^3} \cdot \frac{\Delta F}{\Delta d}$$



- kde  $L$  je vzdálenost mezi podporami [mm]  
 $b$  šířka zkušební tělesa [mm]  
 $h$  tloušťka zkušební tělesa [mm]  
 $\Delta F$  zvolený rozdíl hodnot působící síly [N]  
 $\Delta d$  rozdíl hodnot průhybu odpovídající zvolenému rozdílu hodnot  $\Delta F$  [mm]

obr.12 Křivka závislosti síla/průhyb

**Platnost výsledků**

- můžou se vyskytnout tři rozdílné způsoby porušení
  - a) porušení iniciované z povrchu tahovými napětími
  - b) porušení iniciované z povrchu tlakovými napětími
  - c) vnitřní porušení následkem smykových napětí
- u každého zkušební tělesa se stanoví způsob(y) porušení
- jestliže jsou způsoby porušení zkušebních těles téže řady rozdílné, vypočtené hodnoty napětí v ohybu již nejsou statisticky homogenní a zhodnocení výsledků vyžaduje značnou pozornost
- jestliže se zkušební tělesa poruší mimo oblast zatěžovacího trnu, výsledky nelze brát v úvahu, v tomto případě se provede řada opakovaných zkoušek

## 6.2 Stanovení smykové pevnosti mezi vrstvami podle ČSN EN 2377

### Předmět normy

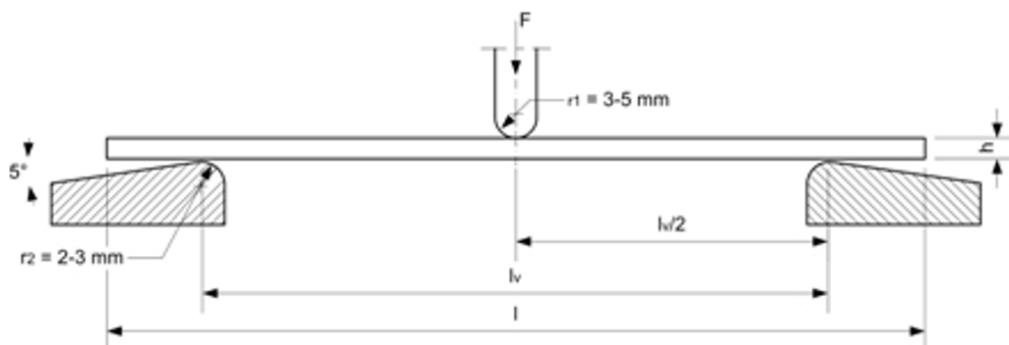
- norma definuje metodu stanovení smykové pevnosti mezi vrstvami delaminací rovinného skelného laminátu, vhodného pro použití v letectví

### Podstata zkoušky

- zkušební těleso pravoúhlého průřezu se zkouší v ohybu pro stanovení odolnosti ve smyku mezi vrstvami paralelně s vrstvami výztuže
- zkušební těleso leží na dvou podpěrách a síla působí uprostřed těchto podpěr prostřednictvím zatěžovacího trnu

### Zkušební zařízení

- umožňuje zajistit konstantní rychlost zatěžovacího trnu a přesnost měření v rozsahu  $\pm 1\%$
- rozpětí podpěr musí být nastavitelné

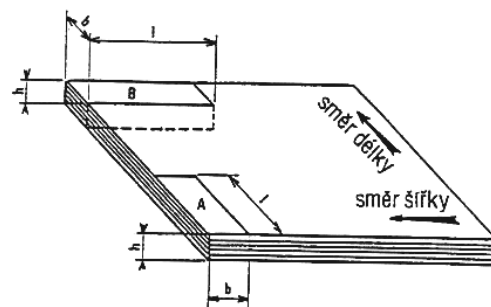


obr.13 Umístění tělesa při zkoušce

### Zkušební tělesa

- počet zkušebních těles – nejméně pět v každém směru
- rozměry v [mm]:

délka	$l = (20 \pm 0,5) \text{ mm}$
šířka	$b = (10 \pm 0,2) \text{ mm}$
tloušťka	$h = (3 \pm 0,2) \text{ mm}$



obr.14 Poloha zkušebních těles

- tam kde není možné nebo žádoucí použít standardní zkušební tělesa, platí:

- a) délka a tloušťka zkušebního tělesa musí být ve stejném poměru jako u standardního tělesa

$$l = 6,7 h \pm 0,5 \text{ mm}$$

- b) šířka a tloušťka zkušebního tělesa musí být ve stejném poměru jako u standardního tělesa

$$b = 3,3 h \pm 0,2 \text{ mm}$$

- jestliže je tloušťka zkušebního tělesa větší než 3 mm, může vzniknout pod zatěžovacím trnem nadměrné napětí v tlaku

**Postup zkoušky**

- kondicionování – standardní atmosféra dle EN 62
  - při  $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$  a  $(50 \pm 5)\%$  relativní vlhkosti vzduchu nejméně po dobu 16 hodin
- změří se rozměry  $b$  a  $h$  na nejbližších 0,05 mm a nastaví se rozpětí podpěr  $l_v = 5h \pm 0,1$  mm
- zkušební těleso se spojitě zatěžuje zatěžovacím trnem (viz obr.13) rychlostí  $V = (1 \pm 0,1)$  mm/min
- rychlost zatěžování se musí brát jako funkce času nebo posunu zatěžovacího trnu

**Vyjádření výsledků**

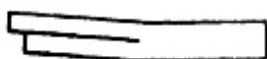
*smyková pevnost mezi vrstvami  $\tau$  [MPa]*

$$\tau = \frac{3}{4} \cdot \frac{F}{b \cdot h}$$

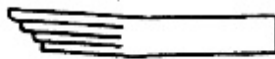
kde  $F$  je nejvyšší zatížení v okamžiku poruchy [N]  
 $b$  šířka zkušebního tělesa [mm]  
 $h$  tloušťka zkušebního tělesa [mm]

**Platnost výsledků**

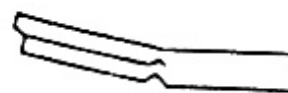
- pokud nastane porucha zkušebního tělesa smykem (viz obr.15a) ve směru jeho podélné osy a přibližně v neutrální ose, vypočítá se správná smyková pevnost mezi vrstvami podle vzorce v předchozím bodě
- pokud se zkušební těleso poruší ohybem (porucha nastane v tahu nebo v tlaku na vnějším povrchu, viz obr.15b), potom výsledky vypočtené v předchozím bodě neudávají skutečnou smykovou pevnost mezi vrstvami (tyto výsledky se používají pro porovnání zkušebních sérií stejného materiálu)
- v případě průsvitného materiálu dojde k zjevnému zbělení



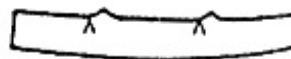
jednoduchý smyk



vícenásobný smyk



smyk a tah

*obr.15a platné poruchy**obr.15b neplatné poruchy*

## 7. Zkoušky pro vlákny vyztužené plasty

### 7.1 Stanovení tahových vlastností podle ČSN EN ISO 527-4

#### Předmět normy

- tato část normy ISO 527 uvádí podmínky pro stanovení tahových vlastností izotropních a orthotropních vláken vyztužených kompozitních materiálů, na základě všeobecných pravidel stanovených v první části (ISO 527-1)

#### Podstata zkoušky

- metoda je vhodná pro:
  - a) vlákna vyztužené termosetické a termoplastické kompozity zahrnující nejednosměrné kompozity jako síťové výztuže, tkaniny, krátká nebo mletá vlákna
  - b) kombinace výše uvedených kompozitů s jednosměrnými a vícesměrnými kompozity zhotovenými podle jednosměrných vrstev
  - c) hotové výrobky zhotoveny z těchto materiálů
- výztuž se může skládat ze skelných vláken, uhlíkových vláken, aramidových vláken a jiných obdobných vláken

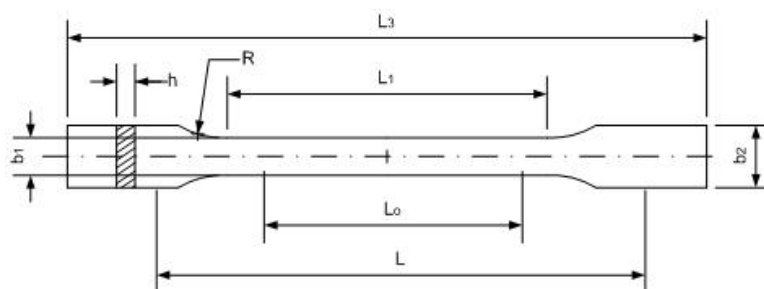
#### Zkušební zařízení

- viz ISO 527-1
- mikrometr s přesností 0,01 mm s přizpůsobenými měřicími doteky

#### Zkušební těleso

- doporučený počet vzorků viz ISO 527-1
- jsou uvedeny tři druhy zkušebních těles:

- a) typ 1B - použitelný pro termosetické kompozity  
- nepoužitelný pro vícesměrné pravidelně vyztužené kompozity



obr.16 Zkušební těleso typ 1B

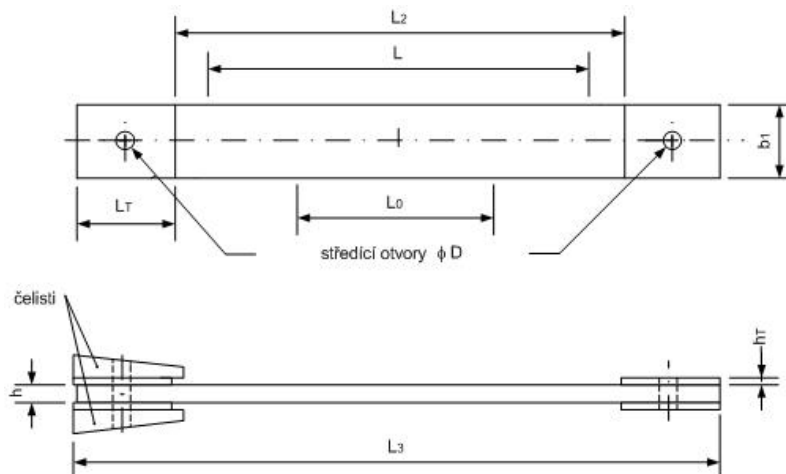
		rozměry v [mm]
kde	$L_3$ je celková délka	$\geq 150^{1)}$
	$L_1$ délka zúžené části	$60 \pm 0,5$
	$R$ poloměr	$\geq 60$
	$b_2$ šířka na koncích	$20 \pm 0,2$
	$b_1$ šířka zúžené části	$10 \pm 0,2$
	$h$ tloušťka	od 2 do 10
	$L_0$ měřená délka (doporučená pro extenzometry)	$50 \pm 0,5$
	$L$ počáteční vzdálenost mezi sevřením	$115 \pm 1$

<sup>1)</sup> pro některé materiály je třeba délku zvětšit (např.  $L_3 = 200$  mm) prokluzování vzorku v čelistech

b) typ 2 (obdélníkový bez koncových přílohek)

typ 3 (obdélníkový s nalepenými koncovými příložkami)

- pro vlákny vyztužené termosety a termoplasty
- zkušební tělesa bez přilepených přílohek jsou považována jako typ 2
- přednostní šířka zkušební tělesa je  $h = 25$  mm, ale mohou být použity i tělesa o  $h = 50$  mm a větší, pokud je pevnost v tahu nízká kvůli konkrétní výztuži
- nejdříve provedeme zkoušku se zkušebním tělesem typu 2, není-li zkouška proveditelná nebo nejsme-li spokojeni s výsledky zkoušky volíme typ 3



obr.17 Zkušební těleso typ 3

			rozměry v [mm]	
			Typ 2	Typ 3
kde	$L_3$	celková délka	$\geq 250$	$\geq 250$
	$L_2$	vzdálenost mezi koncovými příložkami	-	$150 \pm 1$
	$b_1$	šířka (u obou typů)	$25 \pm 0,5$ nebo $50 \pm 0,5$	
	$h$	tloušťka (u obou typů)	od 2 do 10	
	$L_0$	měřená délka (doporučená pro extenzometry)	$50 \pm 0,5$	$50 \pm 0,5$
	$L$	počáteční vzdálenost mezi sevřením	$150 \pm 1$	136
	$L_T$	délka koncových přílohek	-	$\geq 50$
	$h_T$	tloušťka koncových přílohek	-	od 1 do 3
	$\phi D$	průměr středících otvorů	$3 \pm 0,25$	$3 \pm 0,25$

### Postup zkoušky

- viz ISO 527-1
- rychlost zatěžování:
  - pro zkušební tělesa typu 1B
    - 10 mm/min - pro běžnou kontrolu
    - 2 mm/min - pro kvalifikační zkoušku - když měříme maximální prodloužení
    - když zjišťujeme modul pružnosti v tahu
  - pro zkušební tělesa typu 2 a 3
    - 5 mm/min - pro běžnou kontrolu
    - 2 mm/min - pro kvalifikační zkoušku - když měříme maximální prodloužení
    - když zjišťujeme modul pružnosti v tahu

### Vyjádření a platnost výsledků

- viz ISO 527-1

## 7.2 Stanovení smykové pevnosti mezi vrstvami ASTM D 2344

### Předmět normy

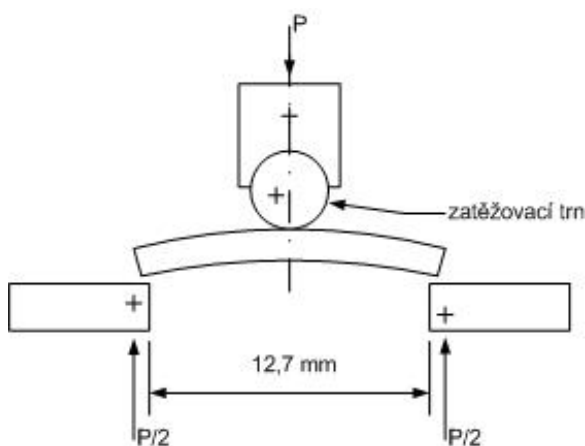
- norma uvádí stanovení meze smykové pevnosti mezi vrstvami zkouškou ohybem pro všechny typy plastů vyztužené rovnoběžnými vlákny
- zkušební tělesem je krátký prstencový nebo plochý trámeček

### Podstata zkoušky

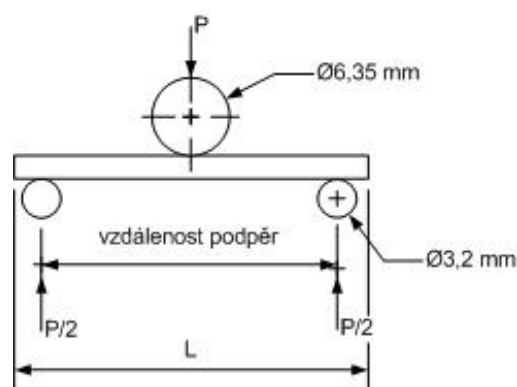
- zkouška dává informace o kvalitě spojení mezi vlákny a pryskyřicí
- jde o zatěžování vzorku ohybem na dvou podpěrách, kde zatížení je aplikováno uprostřed délky zkušebního tělesa, v polovině rozpětí mezi podporami
- tato metoda není limitována rozměry zkušebního tělesa, ale je omezena předepsaným poměrem vzdálenosti podpěr a délky zkušebního tělesa k tloušťce zkušebního tělesa (viz Tab.4)

### Zkušební zařízení

- mikrometr s přesností měření na 0,01 mm
- umožňuje zajistit konstantní rychlost zatěžovacího trnu a přesnost měření v rozsahu  $\pm 1\%$ , rozpětí podpěr musí být nastavitelné
- průměr zatěžovacího trnu je 6,35 mm s povrchem o tvrdosti 60 až 62 HRC



obr.18a Umístění prstencového tělesa při zkoušce



obr.18b Umístění plochého tělesa při zkoušce

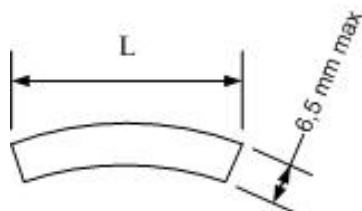
Tab.4 Doporučené poměry vzdálenosti podpěr a délky zkušebního tělesa k tloušťce

výztuž	vzdálenost podpěr/tloušťka <sup>1)</sup>	délka tělesa/tloušťka <sup>2)</sup>
skelná vlákna	5	7
grafitová vlákna	4	6
uhlíková vlákna	4	6
ocelová vlákna	4	6
bórová vlákna	4	6
vysokomodulová organická vlákna (aramid, atd.)	4	6

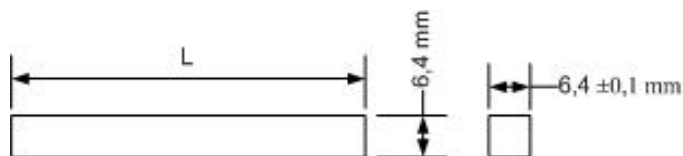
<sup>1)</sup> Vzdálenost podpěr je rovna délce L prstencového zkušebního tělesa (viz.obr.1.a)  
<sup>2)</sup> Celková délka pro ploché zkušební těleso

**Zkušební těleso**

- doporučený počet zkušebních těles – deset
- prstencové zkušební tělesa se vyrobí dle normy ASTM D 2991 (zkušební tělesa typu C)



obr.19a Prstencové zkušební těleso



obr.19b Ploché zkušební těleso

**Postup zkoušky**

- kondicionování dle ASTM D 618
- změří se šířka  $b$  a tloušťka  $h$  uprostřed tělesa s přesností 0,025 mm
- zkušební těleso se umístí do přípravku tak, aby osa zkušebního tělesa byla kolmá na podpory a nastaví se vzdálenost podpěr dle doporučených poměrů v Tab.4
- zkušební těleso se spojitě zatěžuje zatěžovacím trnem rychlostí  $V = 1,3 \text{ mm/min}$
- zaznamenává se síla v závislosti na čase nebo na posuvu zatěžovacího trnu
- zaznamená se síla v okamžiku poruchy ( $P_B$ )

**Vyjádření výsledků**

smyková pevnost [MPa]

$$S_H = 0,75 \cdot \frac{P_B}{b \cdot h}$$

kde  $P_B$  je síla v okamžiku poruchy [N]  
 $b$  šířka zkušebního tělesa [m]  
 $h$  tloušťka zkušebního tělesa [m]

**Platnost výsledků**

- při zkouškách plastů vyztužených vysokomodulovými vlákny (např. aramid), nedochází vždy k porušení smykem, často z důvodu špatného zvolení poměru vzdálenost podpěr a délky zkušebního tělesa ku tloušťce, a proto je důležité zaznamenat druh porušení (smyk nebo tah) a místo poruchy (vpravo, vlevo, uvnitř nebo kompletní rozštěpení zkušební vzorku)
- jestliže se zkušební těleso poruší jiným způsobem než vodorovným smykem je třeba zkoušku zopakovat



### 7.3 Stanovení vlastností v tlaku v rovině výztuže podle ČSN EN ISO 14126

#### Předmět normy

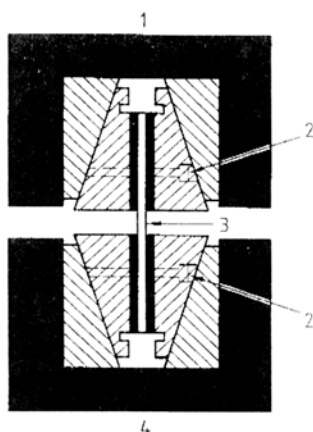
- norma definuje dvě metody stanovení vlastností v tlaku v rovině výztuže vláknny vyztužených plastů

#### Podstata metody

- metody se rozlišují dle způsobu přenášení tlakového zatížení na zkušební těleso:
  - a) smykem pomocí koncových příložek
  - b) přímé zatěžování přes konce zkušební tělesa
- jde o zatěžování obdélníkového zkušební tělesa umístěného ve zkušebním přípravku axiální silou působící na volné délce tělesa
- zkušební přípravek musí zajišťovat porušení tělesa při ohybu tělesa  $<10\%$

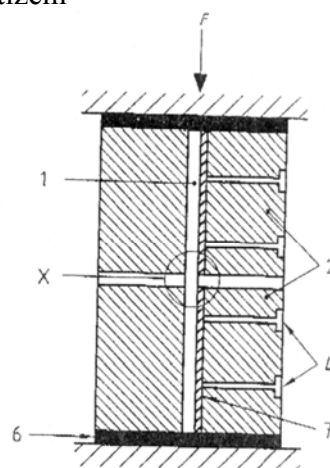
#### Zkušební zařízení

- mikrometr s přesností 0,01 mm
- zkušební stroj s přesností na 1% v rozsahu použitého zatížení



obr.20a Přípravek pro metodu a)

- 1 horní pouzdro
- 2 svírací šrouby
- 3 zkušební těleso
- 4 dolní pouzdro

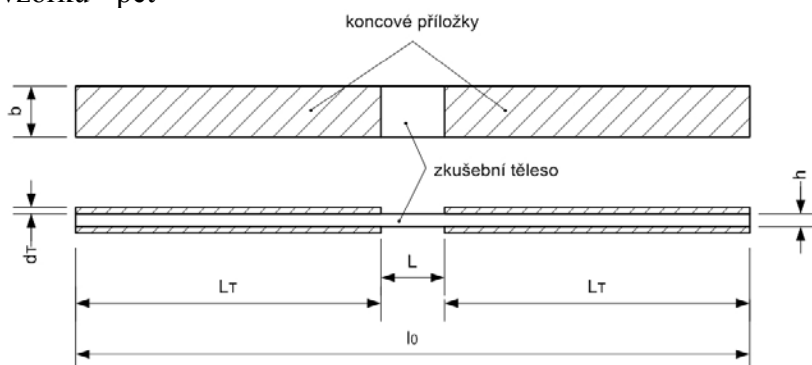


obr.20b Přípravek pro metodu b)

- 1 zkušební těleso
- 2 podpěry
- 3 zkušební těleso
- 4 svírací šrouby
- 5 koncové příložky
- 6 koncová zatěžující deska
- 7 pohyblivá čelní deska

#### Zkušební těleso

- počet vzorků - pět



obr.21 Zkušební těleso

Tab.5 Rozměry zkušebních těles a rozvržení zkoušky

rozměry v [mm]

	symbol	Typ A	Typ B
celková délka	$l_0$	$110 \pm 1$	$110 \pm 1$
tloušťka	$h$	$2 \pm 0,2$	od $2 \pm 0,2$ do $10 \pm 0,2$
šířka	$b$	$10 \pm 0,5$	$10 \pm 0,5$
vzdálenost koncových přílozek	$L$	10	10
délka přílozek	$l_t$	50	50
tloušťka přílozek	$d_t$	1	od 0,5 do 2

**Postup zkoušky**

- kondicionování dle ISO 291
- změří se šířka  $b$  s přesností 0,1 mm a tloušťka  $h$  s přesností 0,02 mm
- zkušební těleso se umístí do přípravku (viz obr.20a,b)
- nastaví se rychlost posuvu 1 mm/min  $\pm 0,5$  a zatěžuje se až do porušení
- zaznamenává se zatížení a napětí (nebo deformace) během zkoušky
- zaznamená se maximální zatížení které těleso vydrží
- zaznamená se způsob porušení

**Vyjádření výsledků**

pevnost v tlaku [MPa]

$$\sigma = \frac{F_{\max}}{b \cdot h}$$

modul v tlaku [MPa]

$$E_c = \frac{\sigma_c'' - \sigma_c'}{\varepsilon_c'' - \varepsilon_c'}$$

- kde  $F_{\max}$  je největší zatěžující síla [N]  
 $b$  šířka zkušebního tělesa [mm]  
 $h$  tloušťka zkušebního tělesa [mm]  
 $\sigma_c''$  napětí v tlaku při  $\varepsilon_c'' = 0,0025$ , [MPa]  
 $\sigma_c'$  napětí v tlaku při  $\varepsilon_c' = 0,0005$ , [MPa]

**Platnost výsledků**

- zkouška je platná, dojde-li k porušení zkušebního tělesa na měřené délce, nebo na jeho koncích (vzdálenost mezi konci přílozek  $L$ )
- průhyb během zkoušky se zanedbá pokud platí:

$$\left| \frac{\varepsilon_{11b} - \varepsilon_{11a}}{\varepsilon_{11b} + \varepsilon_{11a}} \right| \leq 0,1 \quad \text{kde } \varepsilon_{11a} \text{ a } \varepsilon_{11b} \text{ jsou podélná prodloužení na dvou protilehlých stranách zkušebního tělesa}$$

- akceptované způsoby porušení:  
 střihem v rovině výztuže  
 úplné porušení  
 střihem skrz  
 podélné praskliny  
 delaminace

## 8. Závěr

Bakalářská práce je uceleným přehledem normovaných zkoušek kompozitních materiálů používaných v letectví. Zkoušení kompozitů má velký význam, protože jejich výsledné vlastnosti vznikají až při výrobě součástí, a proto je třeba vzniklé metody zkoušek náležitě předepsat a normalizovat.

V současné době dochází ke vzniku víceméně stejných norem a standardů na různých místech pod dohledem různých standardizačních institucí. To má za následek špatnou reprodukovatelnost dat a porovnání materiálů vyhovujících stejným standardům v různých zemích může poskytovat podstatně odlišné výsledky. Nicméně v poslední době se některé instituce snaží o sjednocení některých norem jejich přejímáním.

Cílem této práce je vytvoření stručné příručky o normovaných zkouškách mechanických vlastností kompozitních materiálů. Při tvorbě této práce, jsem se sám přesvědčil o rozdílech v normách a nutnosti jejich unifikace.

## 9. Seznam použité literatury

- [1] Jančař, J.: *Úvod do materiálového inženýrství kompozitů*. ÚCHM FCH VUT Brno, Brno 1999
- [2] Černohorský, J.: *Nejrozšířenější využití kompozitů v České republice je ve výrobě malých sportovních letounů*. Technický týdeník, ročník 2006, č.12
- [3] ČSN EN 2561, Český normalizační institut, 1997
- [4] ČSN EN 2597, Český normalizační institut, 1999
- [5] ČSN EN 2562, Český normalizační institut, 1999
- [6] ČSN EN 2563, Český normalizační institut, 1999
- [7] ČSN EN 2746, Český normalizační institut, 1999
- [8] ČSN EN 2377, Český normalizační institut, 1996
- [9] ČSN EN ISO 527-4, Český normalizační institut, 1998
- [10] ASTM D 2344, American Society for Testing and Materials, 1995
- [11] ČSN EN ISO 14126, Český normalizační institut, 2000
- [12] <http://www.stefanmichna.com>
- [13] <http://www.technicke-normy-csn.cz>
- [14] <http://www.cni.cz>